

•测试、试验与仿真•

一种基于二次外差法产生60 GHz毫米波方案

张 枫, 宁提纲, 李 晶

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要:随着光载无线通信(ROF)的发展,为了得到60 GHz的毫米波信号,提出了一种改进的基于二次外差法八倍频产生毫米波的方案,给出了生成毫米波系统的完整模型,理论分析了系统的可行性及激光器线宽和光纤色散对系统性能的影响。通过OptiSystem软件,对系统进行仿真,调制解调出60 GHz毫米波,验证了方案的正确性。并仿真得到系统的眼图,得到了激光器线宽对系统误码率的影响曲线,证实了窄激光器线宽有利于降低系统的误码率。

关键词:ROF;毫米波;二次外差法;光纤通信

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-00-0070-07

60 GHz Millimeter Wave Production Scheme Based on Secondary Heterodyne Method

ZHANG Feng, NING Ti-gang, LI Jing

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the development of radio-over-fiber (ROF), for getting 60 GHz millimeter wave signal, an improved solution based on secondary heterodyne method to produce eight times frequency millimeter wave is proposed. And a complete model for producing a millimeter wave system is presented. The feasibility of the system is analyzed theoretically and the influence of the laser line width and optical fiber dispersion on the system performances is analyzed. The system is simulated through OptiSystem software, the 60 GHz millimeter wave is demodulated which verifies the correctness of the scheme. The eye diagram of the system and the influence curve of the laser line width on the system bit error rate are obtained, which verifies that the narrow laser line width is helpful to reduce the system bit error rate.

Key words: radio-over-fiber (ROF); millimeter wave; secondary heterodyne method; optical fiber communication

近几年,随着无线通信技术的发展,传统的无线接入方式已不能满足日益增长的宽带业务需求^[1]。光载无线通信技术(ROF)因具有大容量、高传输速率等优势,成为解决宽带无线接入的重要技术之一。其中,毫米波生成技术是无线通信中一项重要

的技术,毫米波是指波长范围1~10 mm,频率范围30~300 GHz的电磁波,具有可利用频谱范围宽、信息容量大,分辨率高、抗干扰性好,全天候通信对沙尘和烟雾具有很强的穿透能力的优势。60 GHz波段的毫米波因处在毫米波传输的“衰减峰”附近,以

收稿日期:2016-11-22

基金项目:国家自然科学基金(61405007);北京市自然科学基金(4154081)

作者简介:张枫(1990-),女,硕士研究生,主要从事微波光子方面的研究;导师简介:宁提纲(1968-),男,博士,教授,主要从事光通信与移动通信、光载无线通信、光纤通信、光纤激光器、全光网络及其关键器件、光纤传感等方面的研究。

60 GHz为中心的8 GHz范围内,衰减不会超过10 dB/km,且60 GHz频段大部分还没有被使用,近几年来,各国政府都在60 GHz频率附近划分了连续的免执照即可使用频谱资源,用户无需负担昂贵的频谱资源^[2]。使得60 GHz毫米波成为光载无线通信(ROF)中研究热点之一^[2]。

随着对ROF系统研究的发展,光学生成毫米波技术可归纳为四类:直接强度调制技术、外部强度调制技术^[3-5]、上变频技术、光学自外差技术^[6]。这些毫米波生成技术的实现方式各不相同,存在着各自的优缺点^[8]。直接强度调制技术是最简单、最直接的一种调制技术,将射频信号直接调制激光器得到已调制的光信号,这种方法简化了基站的复杂程度^[7]。外部强度调制技术是将射频信号通过一个外部光学调制器调制到光载波上。使用最多的外部光学调制器是Mach-Zehnder调制器(MZM)。外部强度调制技术结构简单,能工作在高频系统^[3]。上变频技术是在中心站将中频信号作为副载波,先将数据信息调制在中频信号上,再用已调制的中频信号直接调制光波,上变频技术在光纤链路中传输的是中频信号,受光纤色散的影响小^[6]。光学自外差技术就是利用两束不同频率光波差频,从而得到需要的射频信号。

目前已有的光学生成毫米波技术中,直接强度调制技术整个系统都存在射频信号,系统对激光器的线宽和光电检测器的响应速度都有很高的要求,不适合高频率的射频信号传输^[9]、外部强度调制接收灵敏度较低^[8]、光学自外差技术对光源性能要求较高,远端差频时,两束光波的非相干性及色散效应的作用,会产生很大的相位噪声^[9]、上变频技术基站中需要毫米波本振源和毫米波混频器,基站设备比较复杂^[9]。这些毫米波生成方式具有各自的优缺点。在二次外差的基础之上,提出一种改进的基于二次外差法八倍频产生毫米波的方案,对该方案的设计原理、产生毫米波的性能及仿真结果等进行分析,并证明了该方案的可行性及优越性。

1 八倍频毫米波生成系统

方案利用中频振荡源信号产生毫米波信号,系统结构原理如图1。CW1、CW2为两个相互独立的连续波激光器,具有相位噪声 φ_1 、 φ_2 。DP-MZM为双平行的马赫曾德尔调制器,调制器所对应的三个

子调制单元分别置于MATP、MATP、和MITP^[10],使得其工作状态为光载波抑制(OCS)调制。C1、FPG为环行器和光纤布拉格光栅,其作用是将经过OCS调制的光信号滤波分为上下两路光信号。PD为光电探测器,上下两路信号分别经由PD进行光电转换得到电信号,两路信号进行混频,得到的信号经滤波器进行滤波,得到纯净的毫米波信号。相比文献[10],在进行信号分路时,采用环行器和光纤布拉格光栅代替原方案中光交叉波分复用器,解决了文献[10]中生成的毫米波频率受光交叉波分复用器自身特性的限制,而且光纤光栅具有廉价特性,波长可灵活调节,降低了系统的成本,更容易生成预期频率的毫米波。

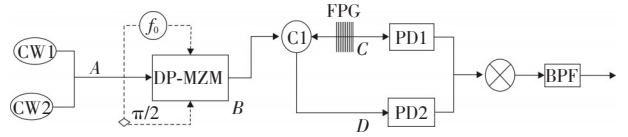


图1 60 GHz毫米波系统原理图

如图1,两个独立的激光器CW1、CW2产生光源的中心频率分别为 f_1 、 f_2 ,相位噪声分别为 $\varphi_1(t)$ 、 $\varphi_2(t)$,输入双平行马赫曾德尔调制器光信号可表示为

$$E_{in}(t) = E_1 \exp(j\omega_1 t + j\varphi_1(t)) + E_2 \exp(j\omega_2 t + j\varphi_2(t)) \quad (1)$$

E_1 、 E_2 分别为光信号的振幅,令 $E_1 = E_2 = E_0$ 。将双平行马赫曾德尔调制器所对应的三个子调制单元分别至于最大、最大和最小传输点,且DP-MZM上下两个子调制单元偏置电压为0,主调制单元偏置电压为 V_π (半波电压),本振源输出射频信号角频率为 ω_{RF} , m 为调制系数($m = \pi V_{RF} / 2V_\pi$),调节本振源输出电信号的幅度 V_{RF} 可以改变调制系数 m 。调制器对输入光信号 E_{in} 进行OCS调制,输出光信号为

$$E_{out} \propto E_{in} \{ \cos[m \cos(\omega_{RF} t)] - \cos[m \cos(\omega_{RF} t + \frac{\pi}{2})] \} \quad (2)$$

对式(2)进行贝塞尔展开,有下式

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \exp(jn\omega_{RF} t) \quad (3)$$

其中, $a_n = [j^n + j^n(-1)^n - (-1)^n - 1] J_n(m)$ 是各阶光边带幅度加权值; $J_n(t)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数^[7]。当 $m = \pi$ 时, $J_2(m)$ 、 $J_6(m)$ 、 $J_{10}(m)$ 的值分别为

0.484、0.014 5 和 2.009×10^{-5} , $J_6(m)$ 、 $J_{10}(m)$ 的值相对于 $J_2(m)$ 比较小,可忽略不计,仅考虑 $J_2(m)$ 的影响,式(3)可有以下式

$$E_{\text{out}} \approx 2E_0 J_2(m) \{ \exp[jw_1 t - j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_1(t)] + \exp[jw_1 t + j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_1(t)] + \exp[jw_2 t - j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_2(t)] + \exp[jw_2 t + j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_2(t)] \} \quad (4)$$

式(4)中输出的光信号 E_{out} 有4个频率的分量,分别为 $f_1 - f_{\text{RF}}$ 、 $f_1 + f_{\text{RF}}$ 、 $f_2 - f_{\text{RF}}$ 、 $f_2 + f_{\text{RF}}$, $w_1 = 2\pi f_1$, $w_2 = 2\pi f_2$ 。将光纤布拉格光栅设置合适的中心频率和带宽,包含四个频率分量的输出光信号被滤波为两路信号,边带 $f_1 - f_{\text{RF}}$ 、 $f_2 + f_{\text{RF}}$ 为上路信号 E_1 ,边带 $f_1 + f_{\text{RF}}$ 、 $f_2 - f_{\text{RF}}$ 为下路信号 E_2 ,有以下式

$$E_1 = 2E_0 J_2(m) \{ \exp[jw_1 t + j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_1(t)] + \exp[jw_2 t - j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_2(t)] \} \quad (5)$$

$$E_2 = 2E_0 J_2(m) \{ \exp[jw_1 t - j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_1(t)] + \exp[jw_2 t + j2w_{\text{RF}} t + j\varphi_2(t)] \} \quad (6)$$

上下两路信号分别通过 PD 进行拍频,得到的电信号分别为 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$,公式如下

$$i_1(t) = |E_1(t)|^2 \approx i_{01} + \cos\{(w_2 - w_1 - 4w_{\text{RF}})t + \varphi_2(t) - \varphi_1(t)\} \quad (7)$$

$$i_2(t) = |E_2(t)|^2 \approx i_{02} + \cos\{(w_2 - w_1 + 4w_{\text{RF}})t + \varphi_2(t) - \varphi_1(t)\} \quad (8)$$

其中, i_{01} 、 i_{02} 分别为直流分量;式(7)、式(8)中上下两路电信号之间,信号频率间隔为 $8w_{\text{RF}}$,具有相同的相位噪声 $\varphi_2(t) - \varphi_1(t)$,由于相位噪声的存在,上下两路信号都不能作为最后的毫米波信号来使用,继续对 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 两路信号进行混频,消除相位噪声的干扰,得到的电信号为

$$i_{\text{out}} \propto i_1(t) \times i_2(t) = \cos(8w_{\text{RF}} t) + \cos\{2(w_2 - w_1 - 4w_{\text{RF}})t + 2(\varphi_2(t) - \varphi_1(t))\} \quad (9)$$

由式(9)可知,拍频后得到的电信号 $8w_{\text{RF}}$ 分量与相位噪声无关,得到的电信号经过带通滤波器滤波,得到纯净的 $8w_{\text{RF}}$ 频谱电信号,即通过本方案,获得了八倍频于本振信号毫米波信号,且该信号的频率只与射频信号的频率相关。

2 系统性能分析及仿真

系统中生成的毫米波信号性能受多种因素的影响,器件稳定性、激光器线宽、光纤色散、光链路延时失配等,本方案重点分析激光器线宽和光纤色

散对信号的影响,并通过 matlab 进行仿真实理论分析。虽然毫米波光子发生器能和光纤链路兼容性比较强,但是光纤色散仍是影响光子学方法产生毫米波性能的一个重要的因素。色散的影响在系统中,表现在使不同频率的光信号在光纤中具有不同的传输速率,在实际链路中不同频率分量具有不同的时间延迟,系统图1中,在马赫曾德尔干涉仪和环形器间连接单模光纤,光边带1、2、3、4到达环形器的时延分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ,则经 OCS 调制的输出信号为

$$E_{\text{out1}} = 2E_0 J_2(m) \{ \exp[jw_1(t - t_2) + j2w_{\text{RF}}(t - t_2) + \varphi_1(t - t_2)] + \exp[jw_2(t - t_3) - j2w_{\text{RF}}(t - t_3) + j\varphi_2(t - t_3)] \} \quad (10)$$

$$E_{\text{out2}} = 2E_0 J_2(m) \{ \exp[jw_1(t - t_1) + j2w_{\text{RF}}(t - t_1) + \varphi_1(t - t_1)] + \exp[jw_2(t - t_4) + j2w_{\text{RF}}(t - t_4) + j\varphi_2(t - t_4)] \} \quad (11)$$

基于式(7)、式(8)、式(9)相同原理,得到的八倍频毫米波电信号为

$$i_{8w}(t) \propto \cos(8w_{\text{RF}} t + \Phi) E \{ \cos[\varphi_2(t - t_4) - \varphi_2(t - t_3) + \varphi_1(t - t_2) - \varphi_1(t - t_1)] - \sin(8w_{\text{RF}} t + \Phi) E \{ \sin[\varphi_2(t - t_4) - \varphi_2(t - t_3) + \varphi_1(t - t_2) - \varphi_1(t - t_1)] \} \} \quad (12)$$

且已知 $\Delta\varphi(t)$ 是零均平稳高斯过程^[12],由零均平稳高斯过程性能得知下式

$$E \{ \exp[j\varphi_1(t_1) - j\varphi_2(t_2)] \} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{\Delta\delta \cdot |t_1 - t_2|}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\pi\Delta\delta \cdot |t_1 - t_2|}\right) \cdot \exp(jx) dx = \exp(-\pi\Delta\delta \cdot |t_1 - t_2|) \quad (13)$$

可知得到的八倍频毫米波信号为

$$i_{8w}(t) \propto \exp(-\pi\delta_2 \cdot |t_3 - t_4| - \pi\delta_1 |t_1 - t_2|) \cdot \cos(8w_{\text{RF}} t + \Phi) \quad (14)$$

生成毫米波的功率代价为

$$\Delta p = \Delta A^2 = [\exp(-2\pi\delta_2 \cdot |t_3 - t_4|) - 2\pi\delta_1 \cdot |t_1 - t_2|]^2 \quad (15)$$

其中, δ_1 、 δ_2 为两个激光器的线宽; L 、 D 、 c 分别是色散光纤的长度、色散系数和光速且,由已知光学原理,有以下式

$$|t_3 - t_4| = \frac{4LcDf_{\text{RF}}}{f_2^2} |t_1 - t_2| = \frac{4LcDf_{\text{RF}}}{f_1^2} |t_1 - t_2| \quad (16)$$

通过 matlab 仿真,分析光线色散、激光器线宽对毫米波功率代价的影响。参数设置如下: D 为 17 ps/km.nm、本振频率 f_{RF} 取 7.5 GHz, f_1 、 f_2 分别取 193.41 THz、193.45 THz,单模光纤的传输损耗忽略不计, L 取四组值 50 km、100 km、150 km、200 km,

考虑 $\delta_1\delta_2$ 相等的情况下, ΔP 随着激光器线宽 $\delta_1\delta_2$ 的变化曲线如图2。由图中变化曲线可知,随着激光器线宽的增大,毫米波功率代价也会提高,激光器线宽的变化会带来毫米波信号功率不同程度的衰落。

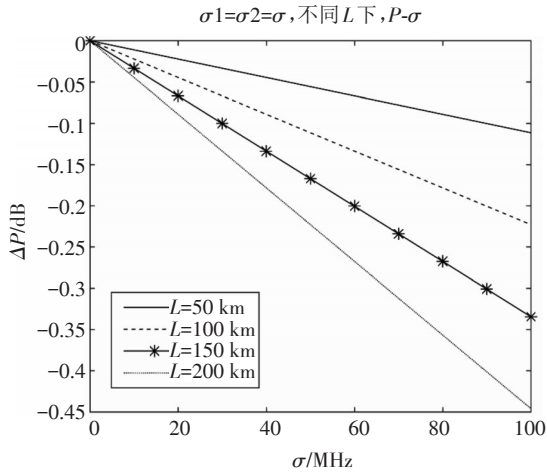


图2 ΔP 随激光器线宽 $\delta_1\delta_2$ 的变化

仿真分析光纤色散对毫米波功率代价 ΔP 的影响,考虑两个激光器线宽 $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ 时的情况, δ 取三组值 50 MHz、150 MHz、250 MHz,改变光纤长度 L ,观察毫米波功率代价随 L 的变化情况。图3为毫米波功率代价受单模光纤长度的影响变化图。

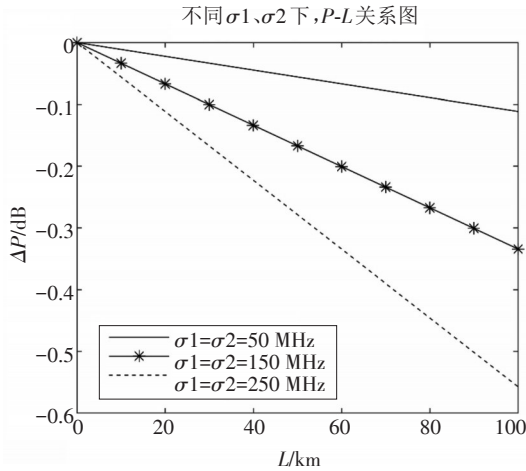


图3 光纤色散对毫米波功率代价的影响 ($\Delta P-L$)

如图所示,随着光纤色散(光纤长度 L)的增大,生成毫米波的功率代价随之增大,同时,变化趋势受激光器线宽的影响,当激光器线宽较小时,生成毫米波功率代价的衰落程度降低。

3 仿真实验

采用OptiSystem 9.0软件对系统进行仿真,仿真图如图4所示。

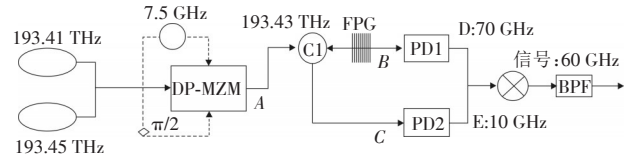
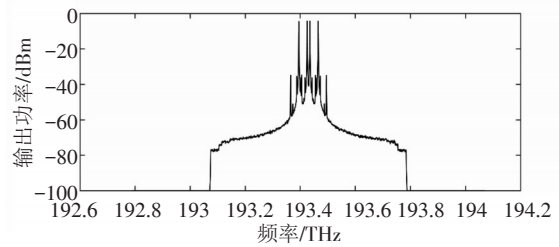
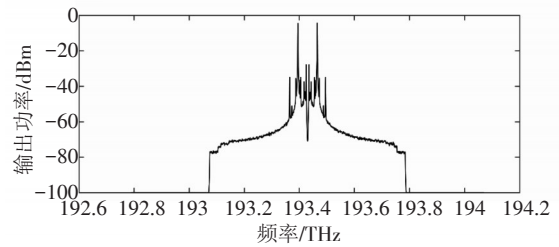


图4 60 GHz毫米波生成系统仿真图

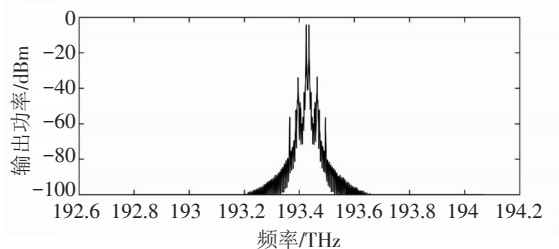
系统仿真图中,激光器光源 CW1、CW2 的频率分别采用 1 550.03 nm (193.41 THz) 和 1 549.71 nm (193.45 THz),输出功率 10 dBm,线宽 10 MHz。射频本振信号的频率 f_{RF} 取 7.5 GHz。双平行的马赫曾德尔调制器消光比 25 dBm,半波电压 4 V, MZ-a, MZ-b, MA-c 的偏置电压分别取 0、0、4V^[10],调制系数为 π 。对应仿真原理图,系统各点仿真频谱结果如图5。



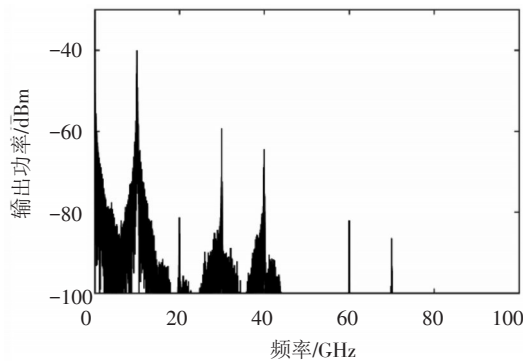
(a)系统仿真图A点处信号频谱



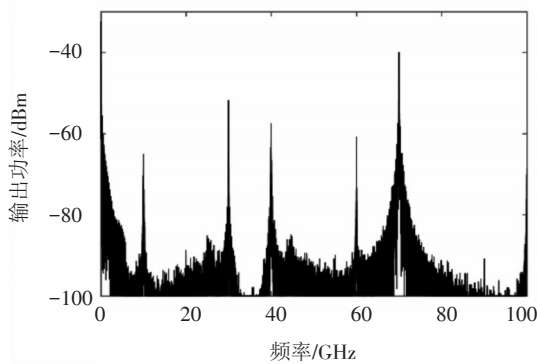
(b)系统仿真图B点处信号频谱



(c)系统仿真图C点处信号频谱



(d)系统仿真图PD1处拍频后信号频谱



(e)系统仿真图PD2处拍频后信号频谱

图5(a)系统仿真图A点处信号频谱;(b)系统仿真图B点处信号频谱;(c)系统仿真图C点处信号频谱;(d)系统仿真图PD1处拍频后信号频谱;(e)系统仿真图PD2处拍频后信号频谱

图5a表示经过光载波抑制调制后的信号,包含四组频率分量,分别为193.395 THz、193.425 THz、193.435 THz、193.465 THz。光纤光栅中心频率取193.43 THz,带宽16 GHz,反射率0.999,四组频率分量的光信号由光纤布拉格光栅和环形器进行滤波,将中间两边带与旁边两边带分离。滤波后,光信号分为两路,上支路信号如频谱图5b,下支路信号如频谱图如图5c。上下两个支路分别通过PD拍频,上支路得到包含70 GHz的频率分量,光谱图如图5d,下支路得到包含10 GHz的频率分量,光谱图如图5e。

上下支路分别包含相位噪声 $\varphi_2 - \varphi_1$,不能作为有效的毫米波光源,将上下两路混频,拍频得到的信号将相位噪声项抵消,将拍频后的信号通过频率60 GHz,带宽200 MHz的低通滤波器,得到纯净的

60 GHz的毫米波,与射频本振信号7.5 GHz相比,得到了60 GHz毫米波,如图6所示。验证了本方案八倍频产生60 GHz毫米波原理的正确性。

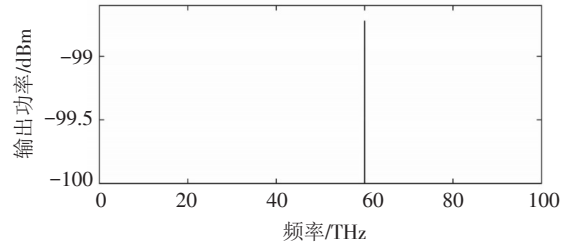


图6 60 GHz毫米波电谱图

为了进一步验证方案原理的正确性,采用非归零伪随机码对10 GHz、70 GHz、60 GHz三个频率点的信号进行强度调制(OOK键控调制),并采用200 Mbps的伪随机码去调制7.5 GHz的本振信号源,并在接收端对三个频率点分别进行相干解调。

根据系统原理中式(7)、式(8),70 GHz、10 GHz的两个频率分量的信号中都存在相位噪声 $\varphi_2 - \varphi_1$ 的影响,信号频率不稳定,不能解调出数据,而60 GHz的频率分量,参照式(9),通过拍频得到了不受相位噪声影响的纯净信号,可解调出伪随机码,在OptiSystem7中进行仿真验证,得到的数据图如图7~图10所示。

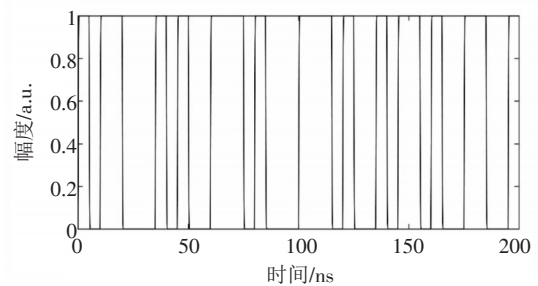


图7 200 Mbps初始调制数据

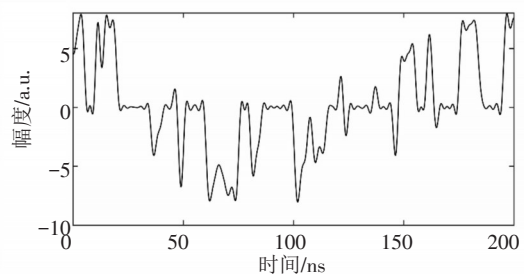


图8 70 GHz解调所得数据

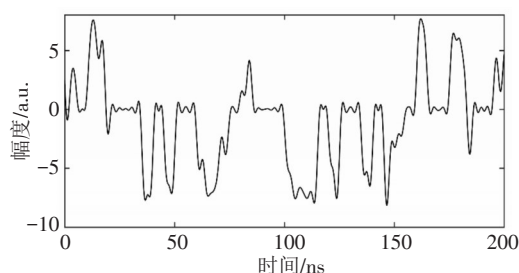


图9 10 GHz解调所得数据

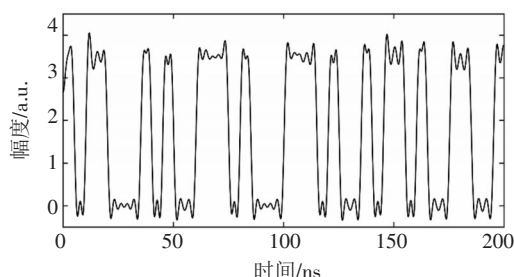


图10 60 GHz解调所得数据

根据仿真数据,图8、图9为70 GHz、10 GHz 频谱点处解调数据所得图形,观察图形可以发现,解调数据信号幅度、变化趋势均与200 Mbps调制信号不符,但图8、图9情况基本一致,验证了两个频率分量中具有相同的相位噪声 $\varphi_2 - \varphi_1$ 的影响。观察图10中数据信号幅度,信号变化情况与图7基本吻合,忽略由于系统不稳定等其他因素引起的信号幅度的抖动,可看出,在60 GHz处,解调出了原始的基带数据,验证了60 GHz频率点处不受相位噪声的影响,此系统中得到了较为纯净的60 GHz毫米波信号。通过仿真数据,验证了本方案基于二次外差法产生八倍频毫米波信号的正确性。

将解调出的基带信号和传输前信号相比较,得到了系统的误码率及体现系统性能的眼图,如图11所示。

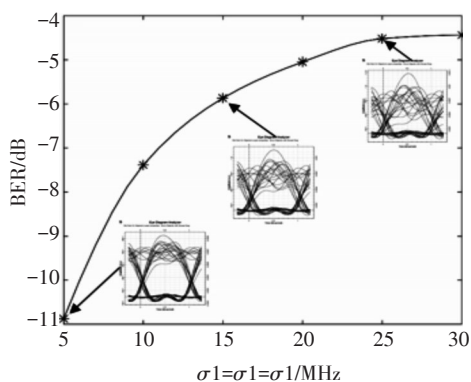


图11 激光器线宽和误码率之间的关系

当激光器线宽 $\delta_1 = \delta_2 = \delta = 5$ MHz时,误码率为 1.30632×10^{-11} ,线宽为15 MHz时,误码率为 1.33192×10^{-6} ,线宽为25 MHz时,误码率为 3.03861×10^{-5} ,随着线宽的增大,系统的误码率明显增大,体现在眼图上,眼图也逐渐变得模糊。证实了激光器线宽对系统的影响。通过仿真解调出60 GHz的信号并得到不同线宽下系统的误码率,验证了仿真实验与理论分析的一致性。此系统能够八倍频得到60 GHz的毫米波信号,并且激光器的线宽影响着整个系统的性能,窄线宽有利于降低该系统的误码率。

4 结 论

提出了一种基于二次外差法八倍频产生毫米波的方案,方案中采用相互独立的激光器光源与7.5 GHz的本振信号通过双平行的马赫增的调制器进行光载波抑制调制,得到四个频率分量的信号通过光纤布拉格光栅和环行器进行滤波,滤波后得到两组信号分别进行拍频,拍频后的两组信号具有相同的相位噪声,为了抵消相位噪声的影响,将两组信号混频,并通过低通滤波器滤波,得到了八倍频于本振源并且不受相位噪声影响的60 GHz毫米波信号。光栅和环行器的使用,增强了系统的灵活性,降低了成本。文中理论分析并仿真了激光器线宽、光纤色散(光纤长度)对生成毫米波功率代价的影响,分析了影响毫米波性能的因素。同时通过OptiSystem9.0软件仿真出了60 GHz的毫米波。通过调制解调10 GHz、70 GHz、60 GHz的信号,证实了八倍频60 GHz毫米波不受相位噪声的影响,验证了此方案的可行性。

参考文献

- [1] 杨旭生, 黄旭光, 谢金玲, 等. 基于单边带调制的光毫米波产生及其传输特性研究[J]. 光电子·激光, 2011(5): 706-710.
- [2] 高嵩. ROF系统中毫米波生成与传输关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [3] Zou X, Pan W, Luo B, et al. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(14):1249-1251.
- [4] Shoji Y, Hamaguchi K, Ogawa H. Millimeter-wave remote self-heterodyne system for extremely stable and low-cost broad-

- band signal transmission[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2002, 50(6):1458-1468.
- [5] 徐刚, 郑小平, 张汉一. 基于四倍频技术的单边带光载毫米波上变频[J]. *光学学报*, 2010(12):3386-3390.
- [6] 贾照娜, 宁提纲, 李晶. ROF系统中毫米波光学生成方法的研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2011(5):35-38.
- [7] 曹东亚, 宁提纲, 李晶. ROF系统中毫米波生成技术的研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2010(4):4-7.
- [8] 许丽丽, 宁提纲, 李晶, 等. 一种改进的基于前向调制技术生成60 GHz毫米波方案[J]. *光学学报*, 2013(2):26-31.
- [9] 贾照娜, 宁提纲, 李晶. ROF系统中毫米波光学生成方法的研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2011(5):35-38.
- [10] 李晶. 微波光子发生器与可调OCSR光单边带调制技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
- [11] 李晶, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于二次外差法的八倍频毫米波光子发生器特性[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(3):352-359.
- [12] 修明磊. 毫米波Radio-over-Fiber传输系统的相关技术研究[M]. 上海:上海大学出版社, 2011.
- ~~~~~
- (上接第9页)
- DR技术[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(2):225-226
- [42] WANG Z, PAN Z, FANG Z, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [43] Wang Z. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853-858.
- [44] 张颜, 娄淑琴, 梁生, 等. 基于多特征参量的 Φ -OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J]. *激光*, 2015(11):134-142.
- [45] 沙洲, 杨洋, 封皓, 等. 基于 Φ -OTDR技术的城市地下供水管网主干线泄漏检测与定位[J]. *中国仪器仪表*, 2016(11):72-76.
- [46] 穆立波, 吴悦峰, 姚剑. 分布式光纤震动传感系统的多点定位问题研究[J]. *传感器与位系统*, 2010, 29(6):42-45.
- [47] Mahmoud S S, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Nuisance alarm suppression techniques for fibre-optic intrusion detection systems[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012:8351.
- [48] Seedahmed, MAHMOUD, Yuvaraja, et al. Real-time distributed fiber optic sensor for security systems: performance, event classification and nuisance mitigation[J]. *Photonic Sensors*, 2012, 2(3):225-236.
- [49] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over > 100 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [50] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. *Nature Communications*, 2016, 7.
- [51] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(8): 085204.
- [52] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(11): 115106.
- [53] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse diverse frequency probe signal[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(6): 065101.
- [54] Sifta R, Munster P, Sysel P, et al. Distributed fiber-optic sensor for detection and localization of acoustic vibrations [J]. *Metrology & Measurement Systems*, 2015, 22(1):111-118.
- [55] 袁志彬. 我国城市供水管网漏失率状况及其管理措施[J]. *城市管理与科技*, 2004, 2:82-84.
- [56] 周刚基. 基于光纤传感技术的城市地下管廊综合监控系统的应用与发展[J]. *中国安防*, 2015, 12:26-30.
- [57] 俞国锋. 分布式传感技术在城市综合管廊的应用[J]. *建筑电气*, 2015, 12:46-49.
- [58] 林文台, 梁生, 娄淑琴, 等. 一种低误报率的新型光纤分布式振动传感系统[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1845-1848.